Hans Teninger
Diss. Freiburg
1914.

DIE ELEKTRISCHE LEITFÄHIGKEIT UND INNERE REIBUNG VERDÜNNTER AMALGAME.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE VORGELEGT DER NATURWISSENSCHAFTLICH-MATHEMATISCHEN FAKULTÄT DER ALBERT-LUDWIGS-UNIVERSITÄT ZU FREIBURG i. BR.

VON

HANS FENINGER

AUS FREIBURG i. BR.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

FREIBURG I. BR. :: CARITAS-DRUCKEREI. :: 1914.

Dekan: **Prof. Dr. L. Gattermann.**

Referent: **Geh. Rat Prof. Dr. F. Himstedt.**

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Januar 1914.

Meiner Mutter!

Inhaltsverzeichnis.

Seite

§ 1. Einleitung 7

A. Messungen der elektrischen Leitfähigkeit.

§ 2. Das Quecksilber 9
§§ 3—11. Apparate und Herstellung der Amalgame . . 9
§§ 12—13. Versuchsanordnung und Meßmethode 13
§§ 14—15. Ausführung der Messung 16
§§ 16—19. Ergebnisse 21

B. Messungen der Viskosität.

§ 20. Vorbemerkung 26
§§ 21—22. Der Apparat und seine Füllung 26
§ 23. Versuchsanordnung 28
§§ 24—27. Methode der Messung 29
§§ 28—30. Berechnung des Reibungskoeffizienten 31
§§ 31—33. Ergebnisse 33

C. Theoretischer Teil.

§§ 34—35 36
§§ 36—37. Anhang 40

D. Zusammenfassung der Resultate.

A. Leitfähigkeit 42
B. Viskosität 44

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545322_0122

Einleitung.

§ 1. Eine Beziehung zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der inneren Reibung von verdünnten Amalgamen hat zuerst E. R. von Schweidler[1] gesucht. Er maß die Temperaturkoeffizienten der inneren Reibung und der elektrischen Leitfähigkeit einiger Kadmium-, Zink-, Zinn- und Bleiamalgame und kam zu dem Resultat, „daß bei den verdünnten Amalgamen die bei vielen Lösungen beobachtete Übereinstimmung des Temperaturkoeffizienten der inneren Reibung und der elektrischen Leitfähigkeit nicht besteht, ja, daß diese beiden Koeffizienten von verschiedener Größenordnung sind“[2]. Die Schweidlersche Versuchsanordnung erscheint nicht völlig einwandfrei, da er einige Amalgame zum Schutz gegen Oxydation mit verdünnter Säure überschichtete; die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuche ergeben, daß diese Anordnung tatsächlich zu Fehlern Anlaß gegeben hat. Weitere Messungen der Viskosität verdünnter Amalgame sind nicht veröffentlicht worden; dagegen ist ihre elektrische Leitfähigkeit verschiedentlich Gegenstand der Untersuchung gewesen. In den hier untersuchten Konzentrationsbereich fallen die Beobachtungen von G. von Rauschenplat[3] und A. Larsen[4]. Larsens Beobachtungen geben das auffallende Resultat, daß die relative

[1] Wiener Berichte CIV (2a), S. 273 (1895). [2] Ebd.
[3] Diss. Aachen 1912, und Metallurgie IX. (1912), Heft 15 u. 16.
[4] Ann. d. Phys. I (1900), S. 123.

Leitfähigkeit der Amalgame (bezogen auf Quecksilber von derselben Temperatur) mit steigender Temperatur wächst, der spezifische Widerstand also langsamer zunimmt als der des reinen Quecksilbers, trotzdem der Temperaturkoeffizient des zugesetzten Metalls größer ist als der des Quecksilbers. Man kann, da bei Larsens Versuchen die Amalgame in feuchtem Zustande — das heißt benetzt mit Wasser oder der Lösung eines Elektrolyten — zur Verwendung kamen, den Verdacht nicht von der Hand weisen, daß der Temperaturkoeffizient des in dem Amalgam enthaltenen Elektrolyten das Resultat beeinflußt hat. Es erschien daher wünschenswert, die Leitfähigkeit und die Viskosität verdünnter Amalgame unter Vermeidung der angeführten Fehlerquellen nochmals zu messen und die Messungen auch auf bisher noch nicht untersuchte Amalgame auszudehnen. Ein Mittel, den Einfluß eines Gehaltes an Feuchtigkeit und eine Oxydation vollständig auszuschließen, bot die Vornahme der Messungen im Vakuum. Die Beobachtungen wurden auf sehr verdünnte Amalgame beschränkt, da in diesen das Metall einatomig in Quecksilber gelöst ist[1] und vermutlich in solchen Lösungen zuerst Beziehungen von Leitfähigkeit und Viskosität zu andern Eigenschaften erkennbar sein werden.

[1] G. Meyer, Zeitschr. f. phys. Chem. VII, S. 477.

A. Messungen der elektrischen Leitfähigkeit.

Das Quecksilber.

§ 2. Das bei allen Untersuchungen der Leitfähigkeit und der Viskosität verwendete Quecksilber war auf folgende Weise gereinigt. Es wurde bei 70° C mit konzentrierter Schwefelsäure, der einige Tropfen Salpetersäure zugesetzt waren, geschüttelt, von Säure und Oxyden durch Filtration befreit, mit Wasser durchspült, wieder filtriert und bei 120° C getrocknet. Das reine Quecksilber wurde in einen mit der Gaede-Quecksilberluftpumpe in Verbindung stehenden Destillierapparat gefüllt und im Vakuum in die zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit und der Viskosität dienenden Glasapparate überdestilliert.

Apparate und Herstellung der Amalgame.

§ 3. Für die Messungen waren zwei verschieden konstruierte Glasapparate in Gebrauch.

Form 1

diente zur Untersuchung der Schwermetallamalgame (Figur 1). Die U-förmig gebogene Kapillare C von 50 cm Länge und 1 mm innerem Durchmesser erweitert sich an beiden Enden E_1 und E_2 in Röhren R_1 und R_2 von 1,4 cm Durchmesser. An R_1 ist bei H ein nach vorn senkrecht zur Ebene der Zeichnung verlaufendes Rohr angeschmolzen, welches an einem senkrecht angesetzten Glasrohr G eine Kugel K von 3,5 cm Durch-

messer trägt. R_2 geht in ein Rohr L von 0,5 cm Durchmesser und etwa 25 cm Länge über. Bei E_1 und E_2 sind Platindrähte durch die Wandung hindurchgeschmolzen. Sie münden außen in rechtwinklig aufgebogene Zuleitungsrohre Z_1 und Z_2 von 12 cm Länge und 0,5 cm Durchmesser. Die Rohre G und L sind an den freien Enden offen.

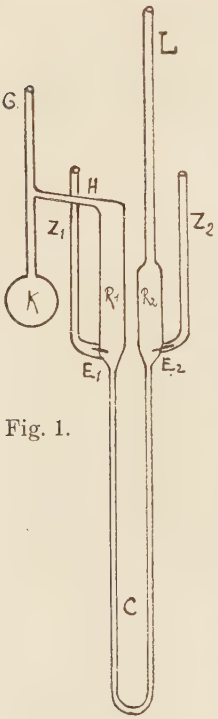


Fig. 1.

§ 4. Vor jeder Füllung wurde der ganze Glasapparat mit Königswasser, dem einige Tropfen konzentrierte Schwefelsäure zugesetzt waren, gereinigt, mit destilliertem Wasser ausgespült und mittelst Durchsaugen warmer Luft getrocknet. Dann wurde die Kugel K mit einer gewogenen Menge des später in Quecksilber aufzulösenden Metalls beschickt, die Öffnung G zugeschmolzen, der Apparat bei L an den Quecksilberdestillierapparat in schwach gegen die Horizontale geneigter Stellung so angeschmolzen, daß die beiden Schenkel der Kapillare vertikal übereinander lagen, und evakuiert. War der Druck auf 0,001—0,0002 mm *Hg* gefallen, so ließ man etwa 80 g Quecksilber überdestillieren. Das Quecksilber lief durch L und R_2 in die Kapillare. Stellte man nach dem Abschmelzen den Apparat vertikal, so stand das Quecksilber in R_1 und R_2 etwa 1 cm über den Platindrähten.

§ 5. Die verdünnten Amalgame der Metalle *Zn, Cd, Sn, Pb, Bi, Tl, Au* wurden durch Auflösen gewogener blanker Stückchen des betreffenden Metalls in Quecksilber hergestellt. Durch Neigen des Apparates brachte

man alles Quecksilber aus der Kapillare *C* in die Kugel *K*, löste das dort liegende Metall durch Erhitzen und erhielt ein homogenes Amalgam von spiegelblanker Oberfläche, mit welchem nach dem Erkalten die Kapillare gefüllt wurde.

§ 6. Zur Bestimmung der Konzentration goß man nach geschehener Untersuchung das Amalgam aus der Kapillare in die Kugel *K* zurück, sprengte die Abschmelzspitze bei *L* und ließ langsam Luft eintreten. Dann entnahm man das Amalgam bei *G*. Aus dem Gesamtgewicht des Amalgams und der eingeführten Menge Metall ergibt sich die Konzentration.

§ 7. Form 2 (Figur 2) war erforderlich zur Untersuchung der Amalgame der leicht oxydierbaren Alkali- und Erdalkalimetalle. Sie zeigt gegen Form 1 folgende Abänderungen: Die Kugel *K* ist unmittelbar an das Horizontalrohr *H* angeschmolzen und trägt einen seitlichen Fortsatz *F*. Aus der Kugel *K* führt nach oben zu dem Gefäß *W* ein Glasrohr, in welches ein Trichter *T* eingeschmolzen ist, dessen Spitze gegen die Kugel weist. Das Gefäß *W* besitzt ein Ansatzrohr *A* und steht durch *V* mit R_1 in Verbindung. Der Apparat ist bei *L* und *F* offen.

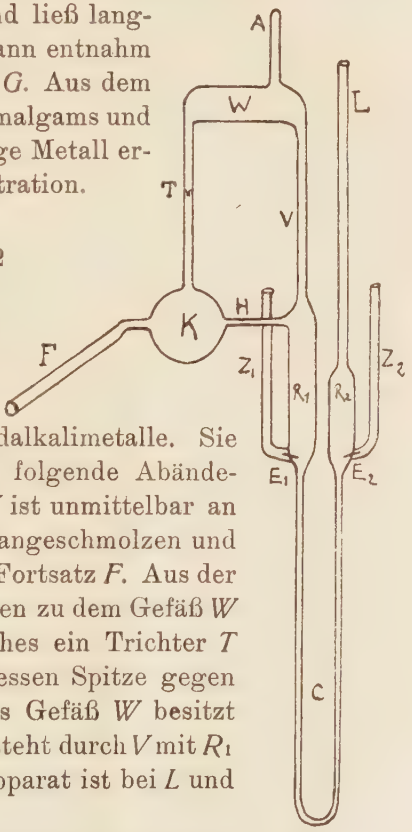


Fig. 2.

Der wie Form 1 (§ 4) gereinigte Apparat wurde bei *F* anstatt mit Metall mit konzentriertem festen Amalgam beschickt und zugeschmolzen.

§ 8. Zur Herstellung der konzentrierten Amalgame von *Na, K, Cs, Rb* fügte man dem unter Paraffinöl geschmolzenen Alkalimetall Quecksilber zu und vereinigte beide Metalle durch Erhitzen.

Die Metalle *Li, Ca, Sr, Ba* wurden in einen nach Maßgabe der Figur 3 in ein Glasrohr eingeschmolzenen Porzellantiegel gefüllt; durch das zum Destillierkolben und zur Luftpumpe führende Rohr *Q* destillierte man eine passende Menge Quecksilber ein, nachdem durch andauerndes Evakuieren und Erhitzen das Metall von seinem Gasgehalt befreit war. Bei weiterem fortgesetztem Erhitzen im Sandbad bis auf 300° C bildete das Quecksilber mit dem Metall ein festes Amalgam.

Fig. 3.

Die konzentrierten Amalgame wurden unter Paraffinöl aufbewahrt und vor dem Einfüllen in die Apparate mit Petroläther gewaschen und mit Filtrierpapier getrocknet.

§ 9. Die Füllung der Form 2 mit Quecksilber gestaltete sich genau wie die der Form 1 (§ 4), ebenso die Herstellung der verdünnten Amalgame (§ 5); nur geschah das Erhitzen in *F*. Das verdünnte Amalgam ließ man durch den Trichter *T*, der alle Oxydspuren zurückhielt, nach *W* und von da beim Aufrichten in Vertikalstellung durch *V* und R_1 in die Kapillare *C* fließen.

§ 10. Die Konzentration der verdünnten Alkali- und Erdalkaliamalgame wurde auf titrimetrischem Wege bestimmt. Nach Beendigung des Versuchs sammelte man das reine Amalgam in dem Gefäß *W* und ließ durch *L* Luft eintreten. Dann öffnete man bei *A*, füllte einen Teil des Amalgams in einen mit einer gemessenen Menge 1/20–n–*HCl* beschickten Kolben, der auf der Wage tariert war, und bestimmte das Gewicht des Amalgams. Nach einigen Stunden titrierte man die überschüssige Säure mit 1/20–n–$Ba(OH)_2$ zurück. Das

gleiche Verfahren wurde mit dem Rest des Amalgams eingeschlagen. Der Prozentgehalt der beiden Proben stimmte im Mittel auf fünf Einheiten in der vierten Dezimale überein. Diese Übereinstimmung zeigt, daß durch das Erhitzen der eingebrachten Metalle oder hochkonzentrierten Amalgame mit *Hg* ein verdünntes Amalgam von vollständiger Homogenität gebildet war.

§ 11. Die eingebrachten Metalle und hochkonzentrierten Amalgame enthielten sämtlich Gase absorbiert, welche beim Auflösen in Quecksilber sich über dem verdünnten Amalgam ansammelten. Der Gasgehalt der verdünnten Alkaliamalgame, der zuweilen zur Bildung von Glasbläschen in der Kapillare Anlaß gab, ließ sich durch mehrstündiges Erhitzen auf 80° C entfernen. Die Beseitigung der Glasbläschen gelang indes nur unvollständig, wenn sich in der Kapillare Kalzium-, Strontium- oder Baryumamalgam befand, weil diese Amalgame die Glaswand der Kapillare benetzten und dem Anschein nach das Glas angriffen. Es sind daher die später angegebenen Leitfähigkeiten und Viskositäten dieser Amalgame mit einer größeren Unsicherheit behaftet als die der übrigen untersuchten Amalgame, welche ihren Gasgehalt in das Vakuum des Apparates abgegeben hatten.

Versuchsanordnung und Meßmethode.

§ 12. Die Apparate waren in senkrechter Stellung in einen mit Wasser gefüllten und durch Gasflammen geheizten Thermostaten, dessen Temperatur durch Toluolregulatoren konstant gehalten wurde, so tief eingetaucht, daß das Wasser einige Zentimeter höher stand als die Platindrähte und das innere Quecksilberniveau. Ein durch einen Elektromotor angetriebener Rührer sorgte für gleichmäßige Verteilung der Temperatur, die ein in $^1/_{10}$ Grade geteiltes Thermometer

anzeigte. Zum Zwecke der Stromzuführung tauchten in die mit Quecksilber gefüllten Röhren Z_1 und Z_2 3 mm starke, amalgamierte Kupferstäbe ein. Diese reichten bis zu den Platindrähten, welche die metallische Verbindung mit der mit Quecksilber oder Amalgam gefüllten Kapillare C vermittelten. An jeden Stab waren zwei lange, isolierte Kupferdrähte angelötet. Ein Gummischlauch, der den Zuleitungsröhren dicht schließend übergestreift war und noch etwa 20 cm weit die Drähte überzog, schützte Quecksilber und Kupferstäbe in Z_1 und Z_2 vor dem Zutritt der äußeren Feuchtigkeit.

§ 13. Der Quecksilber- bzw. Amalgamfaden in der Kapillare C und eine Manganinspule $M_1 M_2$ wurden hintereinander geschaltet von demselben konstanten Strom durchflossen, und der Widerstand der Kapillare durch Vergleich der Potentialdifferenzen an den Enden der Kapillare und der Manganinspule ermittelt. Die Messung geschah nach der Kompensationsmethode, wobei als Nullinstrument ein Kapillarelektrometer in der von Smith[1] gegebenen Form diente.

Die Schaltung ist aus der Tafel 1 ersichtlich. Die Stromleitungen sind – – – und –·–·–, die Meßleitungen ..... gezeichnet. Der Strom I der Batterie A_1 fließt durch das Ampèremeter J und die Manganinspule $M_1 M_2$ zu dem mit Quecksilber gefüllten Napf 11 des Parraffinklotzes P_2 und verläßt denselben durch Napf 17. Durch eine Wippe werden entweder die Verbindungen 11, 10 und 17, 16 oder 11, 10′ und 17, 16′ hergestellt, so daß entweder die Kapillare C mit den Zuleitungen $Z_1 Z_2$ oder eine zweite Kapillare C' mit den Zuleitungen $Z'_1 Z'_2$ in den Stromkreis eingeschaltet ist. Die weitere Drahtverbindung führt von Napf 17 nach 1 in dem Paraffinblock P_1 und nach Überbrückung der Näpfe 1, 2 durch den Regulierwiderstand W zur Bat-

[1] Proc. Phys. Society London XVIII (1903), S. 377—384.

terie zurück. Ein zweiter Strom II — einem Akkumulator A_2 entnommen — durchfließt den Präzisionsrheostaten R und wird durch Überbrückung von 3,4 in P_1 geschlossen. Die Pole der kompensierten Spannung liegen an den Näpfen 20 und 21 in P_3; je nach Schaltung der Wippe in P_3 wird die zwischen $M_1 M_2$ oder $Z_1 Z_2$ (bzw. $Z'_1 Z'_2$) bestehende Potentialdifferenz kompensiert. Als kompensierende Spannung dient der Potentialabfall zwischen den Abzweigstöpseln S_1 und S_2, dessen Größe durch Veränderung des Widerstandes in R reguliert wird. S_1 ist mit Napf 20 in P_3, S_2 mit 7 in P_1, Napf 21 in P_3 mit 5 in P_1 durch Drähte verbunden. Zwischen den Näpfen 8 und 9 liegt das Kapillarelektrometer E. Die Wippe in P_1 ist so eingerichtet, daß bei Stromschluß zunächst der Stromkreis I (Näpfe 1, 2), dann der Stromkreis II (Näpfe 3, 4), schließlich durch Verbindung von 5 mit 6 und 7 mit 8 der Meßstromkreis geschlossen wird. Gleichzeitig wird der bei geöffnetem Strom bestehende Kurzschluß des Kapillarelektrometers in den Näpfen 8, 9 aufgehoben.

Bezeichnet man mit C den Widerstand der Füllung der Kapillare, mit $\mathfrak{M}$ den der Manganinspule, mit w und $\mathfrak{w}$ die in R zwischen den Abzweigpunkten S_1 und S_2 gezogenen, mit W und $\mathfrak{W}$ die gesamten in R gezogenen Widerstände, je nachdem die Spannung in C oder $\mathfrak{M}$ kompensiert ist, so gilt

$$C = \frac{\mathfrak{W} \cdot w}{\mathfrak{w} \cdot W} \times \mathfrak{M}. \tag{1}$$

Da mit dem verwendeten Kapillarelektrometer Potentialdifferenzen bis $^1/_{20000}$ Volt meßbar sind und die Stromstärke im Stromkreis I bei allen Versuchen 0,5 Ampère betrug, so ist der Widerstand bis auf 1×10^{-4} Ohm bestimmbar.

Der Widerstand $\mathfrak{M}$ der in einem Petroleumbad von Zimmertemperatur liegenden Manganinspule beträgt 0,60816 Ohm. $\mathfrak{M}$ wurde nach der beschriebenen Me-

thode gemessen, indem an Stelle von C ein Präzisionswiderstand von 1 Ohm trat. Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes des Manganins ist 2×10^{-5}; die äußersten Schwankungen der Zimmertemparatur beliefen sich auf 6 Grad; mithin berechnet sich die Änderung des Widerstandes der Spule für diesen Fall zu $7{,}3 \times 10^{-5}$ Ohm, eine Korrektion, die zu vernachlässigen ist.

Versuche mit Stromstärken von 0,1, 0,5 und 1,0 Ampère ergaben bei ungeänderter Temperatur übereinstimmende Resultate. Daraus ist zu schließen, daß sich während des 2 bis 3 Sekunden dauernden Stromschlusses in den Messungen weder Joulesche Wärme im Stromkreis, noch ein Rückgang der Spannung der Akkumulatoren geltend macht. Für die Messungen wurde die mittlere Stromstärke 0,5 Ampère gewählt.

Ausführung der Messung.

§ 14. Die Bestimmung der Leitfähigkeit eines Amalgams führte man nun in der Weise aus, daß man zunächst den Widerstand der mit reinem eindestillierten Quecksilber gefüllten Kapillaren bei Temperaturen maß, welche nahe bei 0°, 20°, 40°, 60°, 80° C lagen. Jede dieser Temperaturen wurde durchschnittlich eine Stunde konstant gehalten, und aus mehreren Beobachtungen bei derselben Temperatur das Mittel genommen. Aus diesen Beobachtungen ermittelte man für die einzelnen Temperaturintervalle die Änderung des Widerstandes pro ein Grad. (Alle mit Quecksilber gefüllten Kapillaren besaßen denselben Temperaturkoeffizienten, so daß die Konstanz dieser Größe eine Kontrolle dafür bildete, daß an den Zuleitungen, besonders an den Platindrähten, keine Übergangswiderstände auftraten.) Mittelst der gefundenen Werte reduzierte man die gemessenen Widerstände auf die im Vorstehenden aufgeführten ganzen Temperaturgrade. Alsdann wurde

das Amalgam gebildet und mit der mit Amalgam gefüllten Kapillare dieselbe Beobachtungsreihe bei denselben Temperaturen durchgeführt.

In den so erhaltenen Zahlen sind die Widerstände der Platinzuleitungen eingeschlossen. Ihr 3 bis 8% des Gesamtwiderstandes betragender Wert mußte in Abzug gebracht werden. Um ihn zu bestimmen, zerschnitt man am Ende einer Versuchsreihe den Apparat, so daß zwei Teile $R_1 E_1 Z_1$ (bzw. $R_2 E_2 Z_2$) von der in Figur 4 gezeichneten Form übrigblieben, schmolz die Kapillare C zu, tauchte die Kupferstäbe in die mit Quecksilber gefüllten Teile Z_1 und R_1 (bzw. Z_2 und R_2) bis an den Platindraht ein und maß den zwischen den Stäben liegenden Widerstand bei den genannten Temperaturen nach der oben beschriebenen Methode. Aus den durch Abzug der Zuleitungswiderstände ermittelten Widerständen des Quecksilber- bzw. Amalgamfadens bei allen untersuchten Temperaturen berechnete man schließlich nach der Methode der kleinsten Quadrate die genauen Werte der Widerstände.

Fig. 4.

Die relative Leitfähigkeit des Amalgams erhielt man hieraus, indem man den Widerstand des Quecksilbers durch den des Amalgams bei derselben Temperatur dividierte, die spezifische Leitfähigkeit durch Multiplikation der relativen Leitfähigkeit mit der spezifischen Leitfähigkeit des Quecksilbers bei der betreffenden Temperatur.

§ 15. Zur Erläuterung sei das

Protokoll

der Leitfähigkeitsmessung eines Zinkamalgams hier angefügt.

Eingewogene Menge Zink . .	0,0538	g
Gewicht des Amalgams . . .	84,55	g
Konzentration	0,0636	%

Aus Tabelle 1 sind die direkt beobachteten Daten ersichtlich. Spalte II gibt die Temperatur im Thermostaten an, Spalte III und IV die im Rheostat R gezogenen Widerstände W und w Ohm bei Kompensation der Spannung in der Kapillare, Spalte V die Temperatur des Petroleumbades, in welchem die Manganinspule lag, Spalte VI und VII die in R gezogenen Widerstände $\mathfrak{W}$ und $\mathfrak{w}$ Ohm bei Kompensation der Spannung in M_1 M_2. In Spalte VIII sind die nach der angegebenen Formel (1) berechneten Widerstände C der Quecksilber- bzw. Amalgamsäule aufgeführt. Die Änderung dieses Widerstandes für ein Grad Temperaturerhöhung in Intervallen von 20 zu 20 Grad zeigt Spalte IX.

Mit Hilfe der Zahlen aus Tabelle 1, Spalte IX, wurden die gemessenen Widerstände auf ganze Temperaturgrade reduziert; siehe Tabelle 2, Spalte III. Die nach der gleichen Methode gemessenen und auf ganze Grade reduzierten Werte der Zuleitungswiderstände sind in Spalte IV angegeben, in Spalte V die Widerstände des Quecksilber- und Amalgamfadens nach Abzug der Zuleitungen. Dieser Widerstand wurde in Abhängigkeit von der Temperatur t dargestellt durch die Formel:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t + \beta t^2 \tag{2}$$

und die Konstanten nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet

für Quecksilber: $\omega_0 = +0{,}432237$, $\alpha = +0{,}0003979$, $\beta = +0{,}0000002411$,

für Zinkamalgam: $\omega_0 = +0{,}428114$, $\alpha = +0{,}0004023$, $\beta = +0{,}0000000196$.

Mittelst dieser Konstanten sind die Widerstände für die Temperaturen 0°, 20°, 40°, 60°, 80°, 18° berechnet und in Spalte VI eingetragen. Die Abweichung der Rechnung gegen die Beobachtung zeigt Spalte VII. Aus den Werten in Spalte VI findet man durch Di-

Tabelle 1.

I	Kapillare Temp. II	Kapillare W III	Kapillare w IV	Manganinspule Temp. V	Manganinspule $\mathfrak{W}$ VI	Manganinspule $\mathfrak{w}$ VII	$C = \mathfrak{M}\frac{\mathfrak{W}\,w}{\mathfrak{w}\,W}$ VIII	Änderung von C pro 1° IX
Quecksilber	0,10	2367,9	300	19,0	1802,3	302,3	0,45938	
	19,41	2428,0	300	20,0	1871,9	300	0,46887	0,00107
	39,54	2393,0	300	18,5	1883,3	300	0,47864	0,00104
	59,90	2346,0	300	18,5	1887,5	300	0,48926	0,00109
	79,58	2300,9	300	18,5	1890,8	300	0,49976	0,00109
Zinkamalgam	0,10	2441,8	300	19,5	1828,0	300	0,45530	
	18,38	2434,5	300	19,5	1857,7	300	0,46408	0,00106
	39,76	2421,5	300	19,5	1890,0	300	0,47469	0,00107
	59,91	2364,3	300	19,5	1883,4	300	0,48446	0,00102
	79,58	2324,6	300	19,5	1890,6	300	0,49461	0,00107

Tabelle 2.

Widerstände in Ohm

I	Temp. t^0 C II	auf ganze Grade reduziert III	der Zuleitungen IV	nach Abzug der Zuleitungen beobachtet V	berechnet VI	V—VI VII	Relative Leitfähigkeit VIII
Quecksilber . . .	0	0,45933	0,02712	0,43221	0,43224	— 0,00003	
	20	0,46916	0,02879	0,44037	0,44029	+ 0,00008	
	40	0,47888	0,03043	0,44845	0,44854	— 0,00009	
	60	0,48931	0,03229	0,45702	0,45698	+ 0,00004	
	80	0,49999	0,03438	0,46561	0,46561	± 0,00000	
	18	—	—	—	0,43948	≷ 0,00000	
Amalgam	0	0,45525	0,02712	0,42813	0,42811	+ 0,00002	1,0096
	20	0,46488	0,02879	0,43609	0,43617	— 0,00008	1,0091
	40	0,47480	0,03043	0,44437	0,44424	+ 0,00013	1,0097
	60	0,48451	0,03229	0,45222	0,45232	— 0,00010	1,0103
	80	0,49483	0,03438	0,46045	0,46042	+ 0,00003	1,0113
	18	—	—	—	0,43536	≷ 0,00000	1,0095

vision der für Quecksilber und Amalgam geltenden Zahlen in Spalte VIII die relativen Leitfähigkeiten des Amalgams bei den genannten Temperaturen.

Ergebnisse.

§ 16. Bestimmt wurde in der beschriebenen Weise die Leitfähigkeit der verdünnten Amalgame von *Zn, Cd, Sn, Pb, Bi, Tl, Au, Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba.* Die Resultate sind in der Tabelle 6 (am Schluß) niedergelegt. Tabelle 6 enthält die Konzentration der Amalgame in Atom- und Gewichtsprozenten, die relativen Leitfähigkeiten bei den Temperaturen 0°, 20°, 40°, 60°, 80°, 18° C, sowie die spezifische Leitfähigkeit bei 18° C.

§ 17. Ein Vergleich der in Tabelle 6 aufgeführten Zahlen mit den Beobachtungen Larsens[1] zeigt eine Übereinstimmung der Werte für die *Zn-* und *Sn-*Amalgame bei allen Konzentrationen, während die für *Cd-*, *Bi-*, *Pb-*Amalgame gefundenen Werte Larsens im Mittel um zwei pro Mille niedriger sind als die in Tabelle 6 aufgeführten. Diese geringe, stets in demselben Sinne sich zeigende Abweichung ist vielleicht eine Folge des von Larsen beobachteten Auftretens kleiner Glasbläschen in der Kapillare des Widerstandsgefäßes. Die in der Einleitung erwähnte Verwendung der Amalgame in feuchtem Zustand hat demnach die Widerstandsmessungen Larsens nicht schädlich beeinflußt. Zwischen seinen Beobachtungen und den hier mitgeteilten besteht gute Übereinstimmung.

Merkbar sind dagegen die Abweichungen von den Angaben G. von Rauschenplats[2], welcher die spezifische Leitfähigkeit der Amalgame von *Li, Na, Cd* innerhalb des hier betrachteten Konzentrationsintervalls maß, jedoch nur sechs Messungen mitteilt. Die

[1] Ann. d. Phys. I (1900), S. 123.
[2] Diss., Aachen 1912.

Angaben sind stets kleiner als die aus Tabelle 6 für die von G. von Rauschenplat benutzten Konzentrationen und Temperaturen durch Interpolation berechneten Werte, und zwar liegen die Abweichungen zwischen 0,5% und 1,5%. Diese Differenzen sind möglicherweise darauf zurückzuführen, daß während der Messungen die Amalgamsäule von einem Strom von drei bis fünf Ampère[1] durchflossen wurde. Leider verhindern diese Unsicherheiten, aus den Messungen v. Rauschenplats Schlüsse auf das Verhalten von Amalgamen in äußerster Verdünnung zu ziehen.

§ 18. Die spezifischen Leitfähigkeiten $\varkappa \times 10^{-4}$ aller untersuchten Amalgame bei 18° C (Tabelle 6, Spalte X) in ihrer Abhängigkeit von der Konzentration werden durch die Kurven der Tafel 2 veranschaulicht. Als Abszisse ist die Konzentration in Atomprozenten, als Ordinate die spezifische Leitfähigkeit $\varkappa \times 10^{-4}$ aufgetragen.

Wie die Kurven zeigen, erhöht ein Zusatz der Metalle *Zn, Cd, Sn, Pb, Bi, Tl, Au, Li, Ca, Sr* (Gruppe 1) zu Quecksilber dessen Leitfähigkeit, ein Zusatz von *Na, K, Rb, Cs, Ba* (Gruppe 2) dagegen erniedrigt dieselbe.

Der Einfluß des dem Quecksilber zugesetzten Metalles auf die Leitfähigkeit des reinen Quecksilbers ist weder der Größe noch dem Sinne nach in eine Beziehung zu der Leitfähigkeit des zugesetzten Metalles zu bringen. So bewirken z. B. das schlecht leitende *Pb* (Leitfähigkeit $\varkappa_{18} \times 10^{-4} = 4{,}84$[2]) und *Sn* ($\varkappa_{18} \times 10^{-4} = 8{,}82$) in gleicher Atomkonzentration eine stärkere Erhöhung der Leitfähigkeit des reinen Quecksilbers ($\varkappa_{18} \times 10^{-4} = 1{,}0462$) als das gutleitende *Au* ($\varkappa_{18} \times 10^{-4}$

[1] Rauschenplat, Diss., Tabellen 1—8, S. 21/22.

[2] Die Werte für $\varkappa \times 10^{-4}$ sind aus den Tabellen von Landolt und Börnstein entnommen.

$= 41{,}28$) oder *Zn* ($\varkappa_{18} \times 10^{-4} = 16{,}51$). *Bi* ($\varkappa_{18} \times 10^{-4} = 0{,}84$), welches schlechter als Quecksilber leitet, verbessert dessen Leitfähigkeit in höherem Maße als *Tl* ($\varkappa_0 \times 10^{-4} = 5{,}68$) und *Ca* ($\varkappa_{18} \times 10^{-4} = 13{,}3$), die beide besser leiten als Quecksilber. Die Alkaliamalgame leiten schlechter als reines Quecksilber, obwohl die Leitfähigkeit der zugesetzten Metalle die des Quecksilbers erheblich übertrifft. Eine Ausnahme bildet das in bezug auf seine Leitfähigkeit zwischen *K* ($\varkappa_{18} \times 10^{-4} = 14{,}9$) und *Rb* ($\varkappa_{18} \times 10^{-4} = 8{,}34$) stehende *Li* ($\varkappa_0 \times 10^{-4} = 11{,}7$), welches eine beträchtliche Erhöhung der Leitfähigkeit des Quecksilbers hervorruft[1]. Das von G. v. Rauschenplat[2] gefundene Resultat: „*Li* wirkt erniedrigend nur bei ganz geringen Zusätzen von der Größenordnung zirka 0,1 Atomprozent und dabei auch nur in nur einem wenig über die Versuchsfehler hinausgehenden Maße“ findet sich in den vorliegenden Messungen nicht bestätigt und ist wohl auf Unsicherheiten der v. Rauschenplatschen Beobachtungen zurückzuführen. *Li*-Amalgam zeigt auch bei den Konzentrationen 0,027 und 0,064 Atomprozent eine größere Leitfähigkeit als reines Quecksilber.

In allen Fällen ist die Erhöhung der Leitfähigkeit des Quecksilbers durch Zusatz eines Metalls der Gruppe 1 und die Erniedrigung durch Zusatz eines Metalls der Gruppe 2 proportional der Konzentration.

Der Einfluß des in Quecksilber gelösten Metalls, gleichgültig ob es eine Vermehrung oder Verminderung der Leitfähigkeit des Quecksilbers hervorruft, steigt

---

[1] Einen analogen Unterschied zwischen dem Verhalten des *Li* und der übrigen Alkalien fand Fr. Schmidt, welcher zeigte, daß der Zusatz von *Li* die Oberflächenspannung des Quecksilbers in entgegengesetztem Sinne beeinflußt wie die übrigen Alkalimetalle, so daß nach Schmidt das *Li* zu den Erdalkalien zu rechnen ist (Diss., Freiburg i. Br. 1911).

[2] Diss., Aachen 1912, S. 15.

mit wachsender Temperatur. Die vorliegenden Messungen bestätigen die von Larsen[1] für die Amalgame des *Cd, Zn, Sn, Pb, Bi* festgestellte Erhöhung der relativen Leitfähigkeit mit wachsender Temperatur und zeigen diese Gesetzmäßigkeit zutreffend für alle Amalgame der Gruppe 1. Umgekehrt sinkt mit steigender Temperatur die relative Leitfähigkeit der Amalgame der Gruppe 2.

Bezeichnet man die spezifische Leitfähigkeit eines Amalgams mit $\varkappa$, diejenige des Quecksilbers bei derselben Temperatur mit σ und bildet den Quotienten

$$\frac{\varkappa - \sigma}{\text{Konzentration in Atomprozenten}} = \varepsilon,$$

so gibt uns dieser Quotient ein Maß für die Änderung der spezifischen Leitfähigkeit des Quecksilbers, wenn sich unter hundert Atomen der Flüssigkeit ein Atom des zugesetzten fremden Metalls befindet. Die Werte dieses Quotienten $\varepsilon \times 10^{-1}$ finden sich in Tabelle 6, Spalte XII. Trägt man $\varepsilon \times 10^{-1}$ als Ordinate einer Kurve auf, deren Abszisse die Atomgewichte sind, so sieht man, daß $\varepsilon \times 10^{-1}$ eine periodische Funktion des Atomgewichts ist. Diese Kurve, deren Züge überall denen der Kurve für die Atomvolumina entgegengesetzt gerichtet sind, ist auf Tafel 4 oben wiedergegeben.

§ 19. Nach dieser Auffassung bewirkt jedes in Quecksilber gelöste Metall selbst in äußerster Verdünnung eine Veränderung der Leitfähigkeit des Quecksilbers, die für jedes Metall eine diesem Metall eigentümliche Größe ist. Diese Auffassung befindet sich im Gegensatz zu der von Skaupy[2], nach welcher das Äquivalentleitvermögen — das heißt die Differenz der Leitfähigkeiten von Amalgam und Quecksilber, hervorgerufen

[1] Ann. d. Phys. I (1900), S. 123.

[2] Zeitschr. f. phys. Chemie LVIII (1907), S. 560.

durch Auflösen von 1 Grammäquivalent Metall in 100 g Quecksilber — bei großer Verdünnung für alle Metalle denselben Wert hat. Das von Skaupy an sieben Amalgamen beigebrachte Zahlenmaterial liefert keine unanfechtbare Stütze seiner Theorie, denn die für die verschiedenen Metalle gefundenen Äquivalentleitvermögen bei unendlicher Verdünnung differieren um 40 %, und diese Zahlen sind auch nur erhalten auf Grund von willkürlichen Voraussetzungen, indem z. B. das *Bi* als einwertig, das *Au* als dreiwertig, die andern Metalle als zweiwertig eingeführt sind[1].

[1] Anmerkung bei der Korrektur: Die Abhandlung von Skaupy in der Zeitschrift Berichte der Deutschen physikalischen Gesellschaft Jahrg. 16, S. 156, 1914, erschien nach Abschluß der vorliegenden Untersuchung und gab keinen Anlaß zu einer Änderung des § 19.

B. Messungen der Viskosität.

Vorbemerkung.

§ 20. Die Untersuchung der inneren Reibung erstreckte sich auf alle Amalgame, deren Leitfähigkeit gemessen worden war, außer auf *Sr*-Amalgam, das wegen seiner Einwirkung auf das Glas (§ 11) Störungen hervorrief. Von einer Vornahme der Messungen bei verschiedenen Temperaturen wurde abgesehen, weil die Erkennung von Gesetzmäßigkeiten, welche der Zusatz von Metallen zu Quecksilber in den Temperaturkoeffizienten der Viskosität hervorbringt, bei dem stets klein bleibenden Metallzusatz nicht zu erwarten war. Dies lehrten Beobachtungen der Viskosität der Zinkamalgame von der Konzentration 0,960 und 3,555 Atomprozent (letzteres besaß von allen untersuchten Amalgamen die höchste Konzentration; die Konzentration der übrigen Amalgame betrug im Mittel 0,45 Atomprozent), deren lineare Temperaturkoeffizienten zwischen 18° und 40° C — 0,00324 bzw. — 0,00339 betrugen, also von dem des *Hg* — 0,00321 nur wenig abwichen.

Der Apparat und seine Füllung.

§ 21. Der Reibungskoeffizient η' der verdünnten Amalgame wurde dadurch ermittelt, daß man bei 18° C nacheinander gleiche Mengen reines Quecksilber und Amalgam durch dieselbe, in ungeänderter Stellung befestigte Kapillare strömen ließ und die Ausflußzeiten maß. Der für Schwer- und Leichtmetallamal-

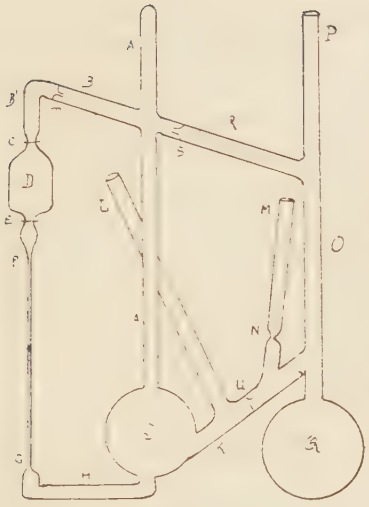


Fig. 5.

game in gleicher Weise benutzte Glasapparat hatte die aus der Figur 5 ersichtliche Form.

Das vertikale Mittelrohr *A* wird von dem schrägstehenden Rohr *BR* durchsetzt. Das Ende von *B* ist bei *B'* senkrecht nach unten umgebogen und geht nach einer mit der Marke *C* versehenen Verengerung in ein zylindrisches Gefäß *D* von 5 ccm Inhalt über. Der Abfluß von *D* erweitert sich unter der Marke *E* birnenförmig, bevor er in die Kapillare *FG* übergeht. Die Kapillare ist 13 cm lang und hat einen inneren Durchmesser von 0,22 mm. Sie mündet in den einen Schenkel des an beiden Enden rechtwinklig aufgebogenen horizontalen Rohres *H*. Der andere Schenkel von *H* trägt eine Kugel *J* von 3,5 cm Durchmesser, die mit dem Mittelrohr *A* und dem seitlich aufsteigenden Rohr *K* verbunden ist. An *K* sind die beiden schräg nach vorn und nach hinten geneigt zur Zeichnungsebene verlaufenden Rohre *L* und *M* angesetzt, und bei *N* durch Eindrücken eines kalten Eisendrahtes in die glühende Rohrwand 2 nach innen ragende Vorsprünge gebildet. Das an *K* angeschmolzene vertikale Rohr *O* ist an seinem unteren Ende zu einer Kugel *Q* von 4 cm Durchmesser aufgeblasen und stellt die Verbindung mit dem eine Skala tragenden Rohr *R* her. *S, T, U* sind kleine Trichter. Der Apparat ist bei *L, M* und *P* offen.

§ 22. In die Kugel *Q* des nach dem in § 4 angegebenen Verfahren gereinigten und getrockneten Appa-

rates wurden durch die Öffnung bei *P* gewogene Stücke Metall bzw. konzentriertes Amalgam (§ 8) eingebracht. Eine zweite Metallmenge wurde bei der Untersuchung der Schwermetalle in das Ansatzrohr *M* gefüllt, wo es auf den Vorsprüngen bei *N* liegen blieb. Dann schmolz man die Öffnung bei *P* und *M* zu, schmolz den Apparat bei *L* in vertikaler Stellung an die Quecksilberluftpumpe und destillierte nach dem Evakuieren bis auf 0,0002 mm *Hg*-Druck durch *L* so viel Quecksilber in das Rohr *H* und die Kugel *J*, daß *J* zur Hälfte gefüllt war (etwa 200 g). Schließlich wurde der Apparat bei *L* wieder abgeschmolzen.

Versuchsanordnung.

§ 23. Um während der Versuche eine ungeänderte Stellung der Kapillare zu erhalten, diente die folgende Anordnung (Figur 6). In der Mitte einer 24 cm langen 8 cm breiten und 0,3 cm dicken Eisenplatte befand sich eine Bohrung, durch die ein kurzes Rohr von 2,5 cm Durchmesser und 2 cm Länge unverrückbar hindurchgesteckt war. In dieses Rohrstück wurde das freie Ende des Mittelrohrs *A* des gefüllten Glasapparates mit Bleiglätte und Glyzerin festgekittet und der Apparat samt Eisenplatte in einen Thermostaten eingesetzt. Die Eisenplatte ruhte auf drei Zapfen in den entsprechenden Vertiefungen zweier Schienen, die den Thermostaten überbrückten. Zur Prüfung der horizontalen Lage war eine Wasserwage *W* auf die Platte aufgeschraubt, während die Festigkeit der Kittung des Apparates durch ein am freien Ende *A* be-

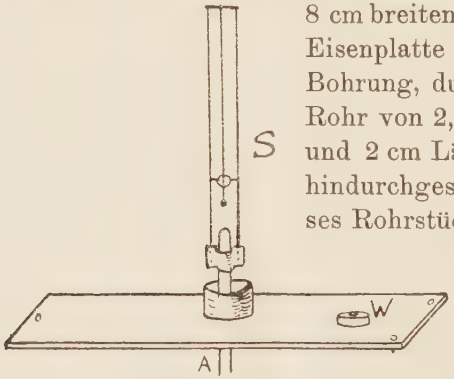


Fig. 6.

festigtes Senkel S kontrolliert wurde. Der etwa 17 Liter fassende, mit Wasser gefüllte Thermostat stand erschütterungsfrei auf einem Steintisch; ein Glimmerfenster in seiner Wandung, 6×10 cm groß, gestattete die Beobachtung der Marken C und E, die von obenher durch eine Glühlampe beleuchtet wurden. Heizung, Rührer, Toluolregulatoren und Thermometer waren dieselben, die bei den Leitfähigkeitsmessungen benutzt worden waren.

Methode der Messung.

§ 24. Um zunächst die Durchflußzeit des reinen Quecksilbers zu messen, hob man den Apparat mitsamt der Eisenplatte aus dem Thermostaten heraus und neigte ihn so, daß das Quecksilber aus J und H durch die Rohre A und B und durch den Trichter T fließend das Gefäß D und das Rohr B' anfüllte und schließlich durch die Kapillare nach H zurückfloß. Dann richtete man den Apparat wieder auf und setzte ihn in den Thermostaten ein. Das noch in A und B vor dem Trichter T befindliche Quecksilber fiel in die Kugel J zurück, während das Quecksilber in B' und D unter seinem eigenen Drucke langsam durch die Kapillare ausfloß. Mit einer Stoppuhr wurde die Ausflußzeit der in D befindlichen Quecksilbermenge bestimmt, indem man den Durchgang des Meniskus durch die Marken C und E beobachtete und zu Anfang, in der Mitte und zu Ende der 300 – 600 Sekunden betragenden Durchflußzeit die Temperatur am Thermometer ablas. Jede Messung wurde mehrmals wiederholt; die Abweichungen in der Durchflußzeit bei gleichbleibender Temperatur blieben stets unter 0,5 pro Mille.

§ 25. Zur Bildung des verdünnten Amalgams goß man alles Quecksilber aus H und J durch das Rohr K in die Kugel Q, wo sich das Metall bzw. konzentrierte Amalgam befand, und löste es durch Erhitzen

auf. Nach dem Erkalten ließ man das verdünnte Amalgam durch die Rohre *O* und *R* und durch den die etwa gebildeten Oxyde zurückhaltenden Trichter *S* in das Mittelrohr *A* und schließlich durch *B*, *B'*, *D* in die Kapillare fließen. Die Messung der Durchflußzeit gestaltete sich genau wie vorher beim Quecksilber.

War bei Untersuchung der Schwermetalle in das Rohr *M* eine zweite Gewichtsmenge Metall eingefüllt worden (§ 22), so brachte man nach der Untersuchung der ersten Konzentration das Amalgam nochmals durch *K* in die Kugel *Q* zurück. Durch entsprechendes Neigen des Apparates füllte man auch das Ansatzrohr *M* mit dem Amalgam und löste durch Erhitzen das in *M* liegende Metall auf. In der Kugel *Q* wurde dann dieses konzentrierte Amalgam mit dem verdünnteren unter Sieden gemischt und die Untersuchung dieser zweiten Konzentration in der beschriebenen Weise vorgenommen.

§ 26. Der Einfluß, welchen die durch Auflösen des Metalls in dem Quecksilber hervorgerufene kleine Volumvermehrung der Flüssigkeit auf die Durchflußzeit ausüben könnte, wird durch Anwendung des Rohres *R* beseitigt. Es ist von dem Trichter *S* ab in $^1/_{20}$ ccm geteilt. Das Volumen des Metalls läßt sich berechnen. Richtet man beim Überfüllen des Amalgams aus *Q* nach *A* in dem Moment den Apparat auf, in welchem die in *R* zurückgebliebene Amalgammenge dasselbe Volumen besitzt, wie das gelöste Metall, so fließt dieses Volumen Amalgam in die Kugel *Q* zurück, und das in den Versuchsraum eingetretene Amalgam besitzt dasselbe Volumen wie das anfänglich anwesende Quecksilber.

§ 27. Nach Beendigung der Messungen schnitt man das die Eisenplatte tragende freie Ende *A* des Glasapparates ab, goß das Amalgam in einen auf der Wage

tarierten Kolben und bestimmte die Konzentration, wie in den §§ 6 und 10 angegeben.

Berechnung des Reibungskoeffizienten.

§ 28. Alle Werte der Durchflußzeiten, die bei einer von 18° C nur um wenige Zehntelgrade entfernten Temperatur gemessen waren, wurden zunächst mit dem Temperaturkoeffizienten des Quecksilbers auf 18° C reduziert. Die Berechtigung zu diesem Verfahren folgt daraus, daß bei den in § 20 erwähnten Beobachtungen zwischen 18° und 40° C die durch den Temperatureinfluß bedingte Änderung der Durchflußzeit pro $^1/_{10}$° C für Quecksilber und für Zinkamalgame 0,960 und 3,555 Atomprozent gleich groß war. Der Reibungskoeffizient η' der verdünnten Amalgame ergibt sich dann aus der Formel[1]:

$$\eta' : \eta = s'\tau' : s\tau. \tag{3}$$

In dieser Formel bedeutet η den Reibungkoeffizienten des Quecksilbers, s und s' sind die spezifischen Gewichte des Quecksilbers und des Amalgams, τ und τ' die Durchflußzeiten.

§ 29. Das spezifische Gewicht s des Quecksilbers ist nach den Tabellen von Landolt und Börnstein bei 18° C 13,5511. Die spezifischen Gewichte der Amalgame von *Zn, Cd, Sn, Pb, Tl* sind aus den Messungen von Richards[2] auf graphischem Wege für die untersuchten Konzentrationen ermittelt worden; die spezifischen Gewichte der übrigen Amalgame wurden unter der Voraussetzung berechnet, daß sie sich additiv aus denen ihrer Komponenten zusammensetzen.

§ 30. Als Ausgangswert für die Bestimmung des Reibungskoeffizienten η des Quecksilbers bei 18° C

[1] F. Kohlrausch, Lehrb. d. pr. Phys. (1910), S. 260.

[2] Zeitschr. f. phys. Chem. LVIII (1907), S. 683; derselbe Zeitschr. f. phys. Chem. LXXII (1910), S. 129 und 165.

legte man die von E. Warburg[1] und S. Koch[2] zwischen 0° und 18,3° C gemachten Beobachtungen zugrunde. Diese Angaben wurden unter Benutzung der von S. Koch gegebenen Formel auf 18° C reduziert und aus den so erhaltenen Werten der Mittelwert $\eta_{18} = 0{,}01575$ gewonnen.

Da aber die Kochsche Formel den Reibungskoeffizienten des Quecksilbers gerade für Zimmertemperatur um 1,2% vom Beobachtungswert abweichend wiedergibt, war es notwendig, den Temperaturkoeffizienten zwischen 0° und 40° C neu zu bestimmen. Zu dem Zwecke dienten die in der Tabelle 3 mitgeteilten Beobachtungen.

Tabelle 3.

Durchmesser der Kapillare: 0,22 mm. Länge der Kapillare: 13 cm.

Temp. t° C I	spez. Gew. s II	Sekunden τ III	η beobachtet IV	η berechnet V	Fehler in % VI
0,18	13,5950	541,9	0,016840	0,016850	— 0,06
10,14	13,5704	523,3	0,016231	0,016210	+ 0,13
18,00	13,5511	508,5	0,015750	0,015745	+ 0,03
20,65	13,5447	503,0	0,015573	0,015594	— 0,13
29,89	13,5220	488,8	0,015108	0,015102	+ 0,04
31,15	13,5189	486,4	0,015030	0,015039	— 0,06
40,12	13,4970	473,8	0,014616	0,014611	+ 0,03

Setzt man $\eta_{18} = 0{,}01575$, so erhält man die in Spalte IV stehenden Werte von η, welche sich durch die Formel:

(4) $\eta = 0{,}016862 - 0{,}000\,067\,01\,t + 0{,}000\,000\,272\,t^2$

darstellen lassen, wie der Vergleich mit den berechneten Werten in Spalte V zeigt.

Mit Hilfe der Konstanten dieser Formel (4) reduzierte man die Beobachtungen von Koch und Warburg ein zweites Mal auf 18° C (siehe Tabelle 4, Spalte VII) und erhielt als Mittelwert wiederum $\eta_{18} = 0{,}01575$.

[1] Pogg. Ann. CXL (1870), S. 367.
[2] Wied. Ann. N. F. XIV (1881), S. 1.

Tabelle 4.

Beobachter	Temp. t ° C	η_t beobachtet	η_t berechnet	Abweichung in %	Abweichung nach Kochs Formel	η_{18} berechnet
I	II	III	IV	V	VI	VII
S. Koch	0,0	0,01688	0,01686	+ 0,12	— 0,53	0,01576
„	0,0	0,01698	0,01686	+ 0,71	+ 0,06	0,01586
„	9,2	0,01631	0,01627	+ 0,25	— 0,56	0,01578
„	10,1	0,01620	0,01621	— 0,06	— 0,70	0,01572
„	11,5	0,01619	0,01613	+ 0,37	— 0,37	0,01580
„	12,5	0,01599	0,01607	— 0,50	— 1,18	0,01566
„	12,8	0,01605	0,01605	± 0,00	— 0,66	0,01574
„	13,6	0,01592	0,01601	— 0,56	— 1,23	0,01566
„	16,7	0,01575	0,01581	— 0,37	— 1,07	0,01567
„	18,3	0,01561	0,01573	— 0,71	— 1,21	0,01563
E. Warburg	17,0	0,01602	0,01580	+ 1,40	—	0,01596
					Mittelwert:	0,01575

Tabelle 3 und 4 zeigen, daß nicht allein die Kochschen Beobachtungen zwischen 0° und 18,3° C durch die Formel (4) besser dargestellt sind als durch die von Koch selbst gegebene Formel, sondern daß die gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und berechneten Werten sich bis 40° C erstreckt.

Ergebnisse.

§ 31. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Sie enthält in Spalte II—VII die Konzentrationen der Amalgame in Atom- und Gewichtsprozenten, das spezifische Gewicht s' der Amalgame, die Durchflußzeiten τ und τ' des Quecksilbers und des Amalgams und den hieraus berechneten Wert des Reibungskoeffizienten η' der Amalgame.

§ 32. Die Messungen weichen von den von R. v. Schweidler[1] mitgeteilten erheblich ab, wie aus Tabelle 5 hervorgeht, welche in Spalte III die aus den v. Schweidlerschen Beobachtungen für 18° C interpolierten Werte des Koeffizienten der inneren Reibung

[1] Wiener Berichte CIV (2a), S. 274 (1895).

enthält, während Spalte IV die aus den Kurven der Tafel 3 abgelesenen Werte η' für die von R. v. Schweidler gewählten Konzentrationen angibt.

Tabelle 5.

	Gewichts-% I	Atom-% II	v. Schweidler η'_{18} III	Feninger η' IV	Abweichung in % V
Hg	—	—	0,01588	0,01575	0,83
Zn Hg	0,6	1,8	0,01648	0,01626	1,35
Pb Hg	0,5	0,5	0,01617	0,01589	1,76
Pb Hg	1,0	1,0	0,01639	0,01605	2,12
Pb Hg	1,5	1,5	0,01668	0,01621	2,90
Sn Hg	1,0	1,7	0,01655	0,01612	2,67

Die Abweichungen zwischen den an Amalgamen gemachten Messungen sind wohl darauf zurückzuführen, daß bei v. Schweidler die Überschichtung der Amalgame mit angesäuertem Wasser durch Salzbildung zu Störungen des Versuchs Anlaß gegeben hat. Auf derartige Vorgänge beziehen sich auch wohl die Worte v. Schweidlers[1]: „Die Untersuchung der Amalgame war mit vielen Schwierigkeiten verbunden, so daß viele Beobachtungsresultate als zu unsicher ausgeschieden werden mußten. Teils oxydierten die Amalgame und verunreinigten so die Kapillare, teils waren sie nicht längere Zeit homogen zu erhalten, so besonders die Zinnamalgame.“

Es sind den weiteren Betrachtungen die in der vorliegenden Untersuchung ermittelten Werte von η' zugrunde gelegt.

§ 33. Der Koeffizient η' der inneren Reibung in seiner Abhängigkeit von der Konzentration wird durch die Kurven der Tafel 3 dargestellt; als Abszissen sind die Konzentrationen in Atomprozenten, als Ordinaten

[1] Wiener Berichte a. a. O.

die absoluten Werte des Reibungskoeffizienten aufgetragen. Aus den Kurven lassen sich folgende Tatsachen ablesen:

Der Reibungskoeffizient η des Quecksilbers wird durch Zusatz eines jeden Metalls erhöht. Während aber die Wirkung der Metalle *Zn, Sn, Bi, Cd, Pb* in gleicher Atomkonzentration von gleicher Größenordnung ist, bringen die Alkalimetalle bei derselben Konzentration die zehn- bis zwanzigfache Erhöhung hervor. Den Übergang zwischen den beiden Gruppen bilden *Tl* und *Au*. Letzteres schließt sich in seinem Verhalten dem der Alkalimetalle an.

Bei allen Amalgamen ist die Zunahme der Viskosität proportional der Konzentration.

Bildet man den Quotienten

$$\frac{\eta' - \eta}{\text{Konzentration in Atomprozenten}} = \zeta,$$

so gibt dieser ein Maß für die Änderung der Viskosität des Quecksilbers, wenn in 100 Atomen der Lösung 1 Atom des gelösten Metalls sich befindet. Man erhält auf diese Weise die in Tabelle 7, Spalte IX, aufgeführten Zahlen. In der unteren Kurve der Tafel 4 sind diese Zahlen in Beziehung gesetzt zum Atomgewicht des in Quecksilber gelösten Metalls. Als Abszissen sind die Atomgewichte, als Ordinaten die Werte des Quotienten $\zeta > 10^5$ aufgetragen. $\zeta \times 10^5$ ist eine periodische Funktion des Atomgewichts. Die diese Funktion darstellende Kurve (in der Figur ausgezogen) fällt bis zum *Ba* nahezu mit derjenigen zusammen, welche das Atomvolumen als Funktion des Atomgewichts darstellt (in der Figur gestrichelt). Nur in dem den höchsten Atomgewichten zugehörenden Teil der Kurve bilden *Tl, Bi, Pb* eine Ausnahme.

C. Theoretischer Teil.

§ 34. Nehmen wir an, die Metalle seien in Quecksilberlösung als einzelne Atome im Lösungsmittel verteilt — ein solcher Zustand ist für viele Metalle aus dem elektromotorischen Verhalten der Amalgame nachgewiesen — und die Atome besitzen Kugelform, so können wir den hydrodynamisch wirksamen Radius der Atome berechnen, wenn die weitere Voraussetzung erfüllt ist, daß das Volumen der Atome des gelösten Metalls groß ist gegen das Volumen der Quecksilberatome. Unter diesen Bedingungen gilt nach Einstein[1] die Beziehung

$$\eta' = \eta\ (1 + 2{,}5\ \varphi) \tag{5}$$

oder

$$\varphi = \frac{\eta' - \eta}{\eta} \cdot \frac{1}{2{,}5}, \tag{6}$$

wo φ das Gesamtvolumen der in 1 ccm Amalgam suspendierten Kugeln, η' die Viskosität des Amalgams, η die Viskosität des Quecksilbers bedeutet. Da die Metalle nur in Amalgamen von sehr geringer Konzentration einatomig gelöst sind, so ist unter den gewählten Voraussetzungen φ eine kleine Größe.

Sind in 1 ccm n wirkliche Atome vom Radius P_1 suspendiert, so ist ihr Gesamtvolumen

$$\varphi = n \cdot \frac{4}{3}\ \pi\ {P_1}^3. \tag{7}$$

Bezeichnet man mit N die Zahl der wirklichen Atome in einem Grammatom, mit A das Gewicht eines Gramm-

[1] Ann. d. Phys. XIX (1906), S. 300 und XXXIV (1911), S. 591.

atoms, mit ϱ das Gewicht der in 1 ccm des Amalgams gelösten Metallmenge, so gilt

$$\frac{n}{N} = \frac{\varrho}{A} = \nu \tag{8}$$

oder

$$n = \nu \cdot N. \tag{9}$$

Setzen wir die beiden Ausdrücke für φ (6 und 7) einander gleich und substituieren für n den Wert aus (9), so erhalten wir

$$N P_1^3 = \frac{0{,}3}{\pi} \cdot \frac{\eta' - \eta}{\eta} \cdot \frac{1}{\nu}^{1} \tag{10}$$

und hieraus

$$P_1 = \sqrt[3]{\frac{0{,}3}{\pi} \cdot \frac{1}{N} \cdot \frac{\eta' - \eta}{\eta} \cdot \frac{1}{\nu}}. \tag{11}$$

Ein zweiter Wert P_2 für den Radius eines Atoms berechnet sich aus dem Atomgewicht A, dem spezifischen Gewicht S und der Anzahl der wirklichen Atome N in einem Grammatom mit Hilfe der Gleichung

$$\frac{4}{3} \pi S N P_2^3 = A$$

zu

$$P_2 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot A}{4 \pi S N}}. \tag{12}$$

N hat nach Planck[2] den Wert $6{,}175 \times 10^{23}$. Die Werte für P_1 und P_2 sind in den Spalten X und XI der Tabelle 7 angegeben.

Die Metalle *Na*, *K*, *Rb*, *Cs*, *Ca*, *Ba* gehorchen den Bedingungen der Theorie, denn ihr Atomvolumen ist größer als das des Quecksilbers. Die Werte von P_1 sind bei ihnen größer als die von P_2; daraus ist zu schließen, daß jedes Atom mit einer Quecksilberatmo-

[1] $\frac{\eta' - \eta}{\eta} \cdot \frac{1}{\nu}$ ist in Analogie zur relativen Spannkraftsverminderung als die relative Viskositätsvermehrung pro 1 Grammatom des in 1 ccm gelösten Metalls zu bezeichnen.

[2] Ann. d. Phys. IV (1901), S. 564.

sphäre umgeben ist, oder daß die Atome dieser Metalle hydrargyrisiert sind. *Li*, *Tl*, *Au* besitzen Atomvolumina, welche dem des Quecksilbers nahe liegen. Die gefundenen Werte von P_1 deuten aber eine so weitgehende Hydrargyrisation der Atome an, daß das Volumen eines Atoms dieser Metalle vermehrt um dasjenige seiner Quecksilberatmosphäre das Atomvolumen des Quecksilbers übertrifft, so daß das Metallatom mit seiner Atmosphäre den Voraussetzungen der Theorie genügt. Für den hydrodynamisch wirksamen Radius der Atome von *Cd*, *Sn*, *Pb*, *Bi* liefert die Rechnung Werte, welche kleiner sind als der aus Gleichung (12) gefolgerte, und für *Zn* sind die Werte von P_1 und P_2 sehr nahe einander gleich. Auf dieses Rechnungsresultat ist kein Gewicht zu legen, weil das Atomvolumen dieser Metalle so klein ist, daß die Bedingungen der Theorie nicht erfüllt sind.

§ 35. Die Viskosität der verdünnten Metallösungen läßt sich in Beziehung setzen zu dem Diffusionskoeffizienten des gelösten Metalls in Quecksilber. Einstein[1] stellt die Gleichung auf:

$$D = \frac{RT}{6\pi\eta NP}, \tag{13}$$

wo D die Diffusionskonstante des Metalls, T die absolute Temperatur, η den Reibungskoeffizienten des Lösungsmittels bedeutet und $R = 8{,}31 \times 10^7$ ist. Erhebt man Gleichung (13) in die dritte Potenz, so erhält man

$$NP^3 = \frac{R^3 T^3}{216\,\pi^3 \eta^3 N^2 D^3}. \tag{14}$$

Verbinden wir diesen Ausdruck mit der Gleichung (10),

$$NP^3 = \frac{0{,}3\,(\eta' - \eta)}{\pi\ \eta\ \nu},$$

so erhalten wir durch Gleichsetzen der rechten Seiten

$$\frac{\eta' - \eta}{\nu} D^3 = \frac{R^3 T^3}{64{,}8\,\pi^2 \eta^2 N^2} = C. \tag{15}$$

[1] Ann. d. Phys. XIX (1906), S. 303.

Die rechte Seite enthält nur Konstanten. Wir können daher für alle Metalle, deren Atomvolumen groß ist gegen das des Quecksilbers, den Satz aussprechen:

> Bei gegebener Temperatur ist die Änderung der Viskosität des Quecksilbers, hervorgerufen durch Auflösen von 1 Grammatom Metall in 1 ccm Quecksilber, multipliziert mit der dritten Potenz der Diffusionskonstanten des Metalles in Quecksilber bei derselben Temperatur, eine Konstante.

Zur Prüfung dieser Beziehung sind die in Spalte XII der Tabelle 7 aufgeführten Diffusionskonstanten aus der Abhandlung von Max von Wogau[1] entnommen. Diese Diffusionskonstanten sind für Temperaturen zwischen 7,3° C und 11,5° C bestimmt, während die Viskositäten sich auf die Temperatur 18° C beziehen. Wegen der geringen Veränderung, welche der Temperaturkoeffizient von η durch Auflösen des Metalls erfährt (§ 20), kann man $\eta' - \eta$ zwischen 0° und 40° C als konstant ansehen und darum die für 18° C bestimmten Werte von $\eta' - \eta$ (Spalte VIII der Tabelle 7) mit den im Mittel für 9,4° C geltenden Diffusionskonstanten verbinden.

Spalte XIII der Tabelle 7 enthält die Werte von

$$\frac{\eta' - \eta}{\nu} D^3 = C.$$

Dieses Produkt ist für die Metalle *Li, Na, K, Rb Cs, Ca, Tl, Au* konstant und hat im Mittel den Wert $8{,}4 \times 10^{16}$. Die Abweichungen von diesem Mittelwert kann man wohl der Unsicherheit zuschreiben, mit der die Bestimmung des in der dritten Potenz

[1] Diss., Freiburg i. Br. 1907 und Ann. d. Phys. 4, Bd. XXIII (1907), S. 345.

eingehenden Diffusionskoeffizienten behaftet ist[1]. Daß die Metalle *Zn, Cd, Sn, Pb* nicht in diese Gesetzmäßigkeit passen, ist zu erwarten, weil ihre Amalgame wegen des geringen Atomvolumens des gelösten Metalls den Voraussetzungen der Theorie nicht Genüge leisten. Für den auf *Ba* bezüglichen, stark abweichenden Wert dieser Konstanten, ist neben der Unsicherheit der Diffusionskonstanten hauptsächlich die ungenaue Kenntnis der Viskosität verantwortlich zu machen (§ 11).

Berechnen wir C aus den konstanten Größen auf der rechten Seite der Gleichung (15), indem wir setzen:

$$T = 282{,}4 \qquad \eta_{9{,}4} = 0{,}016\,23,$$

so ergibt sich der Wert

$$1{,}9 \times 10^{-16},$$

welcher der Größenordnung nach mit der aus Viskosität und Diffusionskonstanten berechneten linken Seite von (15) übereinstimmt. Daß $\frac{\eta' - \eta}{\eta'} D^3$ in allen Fällen größer gefunden wird als die rechte Seite von (15), kann man weder zufälligen Fehlern in der Bestimmung der Viskosität, noch den Unsicherheiten, mit denen die Messung von Diffusionskonstanten behaftet ist, zuschreiben, sondern die stets in demselben Sinne in beträchtlichem Maße auftretende Abweichung führt auf die Vermutung, daß der osmotische Druck nicht die alleinige treibende Kraft ist, welche die Diffusion in Quecksilber bewirkt. Darüber, welcher Art diese den Unterschied zwischen den beiden Seiten von Gleichung (15) bedingenden Kräfte sind, können zurzeit noch keine Angaben gemacht werden.

Anhang.

§ 36. Die Amalgame sind in solcher Verdünnung untersucht worden, daß das in Quecksilber gelöste

[1] Vgl. M. v. Wogau, Diss., Freiburg 1907, S. 28/29.

Metall als einatomig angesehen werden kann. Bei der weiteren Annahme einer Kugelform dieser Metallatome stellt ein solches Amalgam sich als ein heterogener Leiter dar, bestehend aus einem metallischen Leiter von spezifischem Widerstand k_2, in dem wenige Kugeln eines zweiten metallischen Leiters vom spezifischen Widerstand k_1 verteilt sind. Für den spezifischen Widerstand des heterogenen Mediums gibt Maxwell[1] die Formel:

$$K = \frac{2k_1 + k_2 + \varphi_0 (k_1 - k_2)}{2k_1 + k_2 - 2\varphi_0 (k_1 - k_2)}, \tag{16}$$

wo

$$\varphi_0 = \frac{s' \cdot p}{s \cdot 100}$$

das Volumen des in 1 ccm Amalgam gelösten Metalls bedeutet (p = Prozentgehalt des Amalgams, s' spezifisches Gewicht des Amalgams, S spezifisches Gewicht des gelösten Metalls). Siehe Tabelle 7 Spalte XIV.

Führt man die spezifischen Leitfähigkeiten durch die Beziehungen

$$K = \frac{1}{L}; \quad k_1 = \frac{1}{l_1}; \quad k_2 = \frac{1}{l_2} \tag{18}$$

ein, so erhält man für die relative Leitfähigkeit des Amalgams, bezogen auf die des Quecksilbers:

$$\frac{L}{l_2} = \frac{1 - 2\varphi_0 \frac{l_2 - l_1}{2l_2 + l_1}}{1 + \varphi_0 \frac{l_2 - l_1}{2l_2 + l_1}}. \tag{19}$$

Es ist unmöglich, die aus Tabelle 6 durch Interpolation gewonnenen, in Spalte XVI der Tabelle 7 wiedergegebenen relativen Leitfähigkeiten der Amalgame durch die Leitfähigkeiten des Quecksilbers und der gelösten Metalle darzustellen in allen den Fällen, in denen der Zusatz eines besser als Quecksilber leitenden Metalls ein schlechter als Quecksilber leitendes Amalgam hervorbringt (*Na, K, Rb, Cs*), oder, wie im Falle

[1] Lehrb. d. Elektr. u. d. Magn., übersetzt von Weinstein, I (Berlin 1883), S. 457.

des *Bi*, ein schlechter als Quecksilber leitendes Metall ein besser als Quecksilber leitendes Amalgam erzeugt. Aber auch da, wo der Zusatz eines besser als Quecksilber leitenden Metalls eine Vermehrung der Leitfähigkeit des Quecksilbers hervorruft, wird die relative Leitfähigkeit des entstandenen Amalgams niemals durch die Maxwellsche Formel dargestellt. Die Darstellung wird nicht verbessert, wenn man an Stelle von φ_0 den nach Gleichung (6) aus der Viskosität der Amalgame gefolgerten Wert von φ (Tabelle 7, Spalte XV) zugrunde legt (Spalte XVII), außer bei den Amalgamen von *Tl* und *Au*, deren relative Leitfähigkeit unter Benutzung des hydrodynamisch wirksamen Radius der Atome mittelst der Maxwellschen Formel aus den Leitfähigkeiten der Komponenten berechnet werden kann, eine Tatsache, über deren Bedeutung sich augenblicklich nicht urteilen läßt.

§ 37. Eine Beziehung zwischen der Leitfähigkeit und der Viskosität der Amalgame läßt sich vielleicht in dem Verhalten der Kurven der Tafel 4 erblicken, deren Züge stets entgegengerichtet sind, so daß bei geeigneter Wahl des Maßstabes die eine nahezu als das Spiegelbild der andern erscheint. Nur die den Amalgamen des *Tl*, *Bi* und *Pb* entsprechenden Enden der Kurven zeigen diese Gesetzmäßigkeit nicht.

D. Zusammenfassung der Resultate.

A. Leitfähigkeit.

1. Die relativen Leitfähigkeiten verdünnter Amalgame von *Zn, Cd, Sn, Pb, Bi, Tl, Au, Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba* sind bei Temperaturen zwischen 0° und 80° C die spezifischen Leitfähigkeiten für 18° C ermittelt worden.

2. Die Leitfähigkeit des reinen Quecksilbers wird durch Zusatz der Metalle *Zn, Cd, Sn, Pb, Bi, Tl, Au, Li, Ca, Sr* erhöht, durch Zusatz von *Na, K, Cs, Rb, Ba* erniedrigt.

3. Der Einfluß des dem Quecksilber zugesetzten Metalls auf die Leitfähigkeit des Quecksilbers ist weder dem Sinne noch der Größe nach in eine Beziehung zur Leitfähigkeit des zugesetzten Metalls zu bringen.

4. *Li* verhält sich nicht wie ein Alkalimetall; es bringt im Gegensatz zu *Na, K, Rb, Cs* stets eine Erhöhung der Leitfähigkeit des Quecksilbers hervor.

5. Erhöhung und Erniedrigung der Leitfähigkeit des Quecksilbers sind proportional der Konzentration des gelösten Metalls.

6. Der Einfluß des in Quecksilber gelösten Metalls auf die Leitfähigkeit steigt mit wachsender Temperatur.

7. Die Größe der Veränderung, welche die Leitfähigkeit des Quecksilbers durch den Zusatz eines fremden Metalls erfährt, ist für ein Atomprozent des zugesetzten Metalls eine periodische Funktion des Atomgewichts.

B. Viskosität.

8. Der Temperaturkoeffizient der inneren Reibung des Quecksilbers wurde für Temperaturen zwischen 0° und 40° C neu bestimmt.

9. Der Koeffizient der inneren Reibung verdünnter Amalgame von *Zn, Cd, Sn, Pb, Bi, Au, Tl, Li, Na, K, Rb, Cs, Ca, Ba* ist bei der Temperatur 18° C ermittelt worden.

10. Die innere Reibung des Quecksilbers wird durch Zusatz eines jeden Metalls vermehrt, doch ist die Wirkung der Alkalimetalle zehn- bis zwanzigmal so groß als die der Schwermetalle bei gleicher Atomkonzentration.

11. Die Größe der Vermehrung der Viskosität des Quecksilbers ist für ein Atomprozent der gelösten Metalle eine periodische Funktion des Atomgewichts. Die diese Beziehung veranschaulichende Kurve läuft nahezu parallel derjenigen, welche das Atomvolumen als Funktion des Atomgewichts darstellt.

12. Für alle Metalle, deren Atomvolumen groß ist gegen das des Quecksilbers, gilt der Satz:

Bei gegebener Temperatur ist die Änderung der Viskosität des Quecksilbers, hervorgerufen durch Auflösen von 1 Grammatom Metall in 1 ccm Quecksilber, multipliziert mit der dritten Potenz der Diffusionskonstanten des Metalls in Quecksilber bei derselben Temperatur eine Konstante.

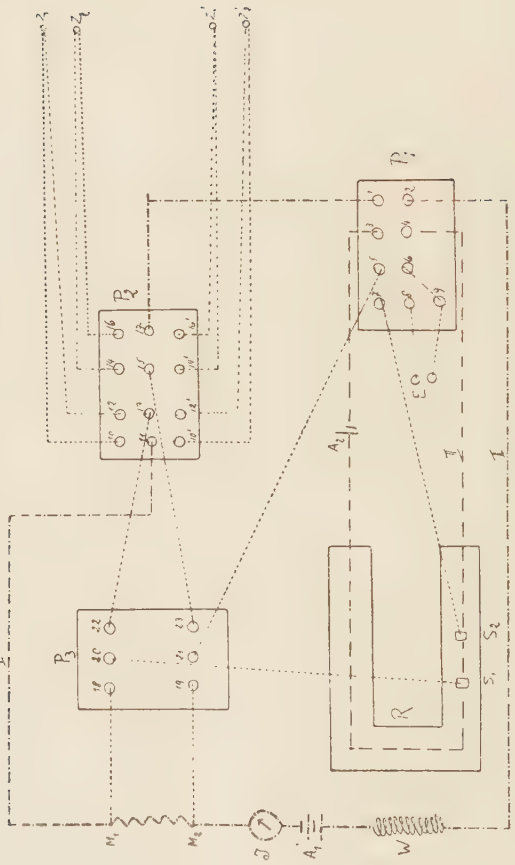
13. Die elektrische Leitfähigkeit der Amalgame läßt sich durch die Formel, die Maxwell für die Leitung des elektrischen Stromes durch heterogene Media gegeben hat, nicht darstellen, auch dann nicht, wenn statt des in die Formel eingehenden Volumens φ_0 des in 1 ccm Quecksilber gelösten Metalls das aus der Viskosität ermittelte größere Volumen φ gesetzt wird.

14. Die Kurven, welche die Änderung der Leitfähigkeit und der Viskosität des Quecksilbers in Abhängigkeit vom Atomgewicht des gelösten Metalls darstellen, haben einen analogen, aber entgegengesetzt gerichteten Verlauf.

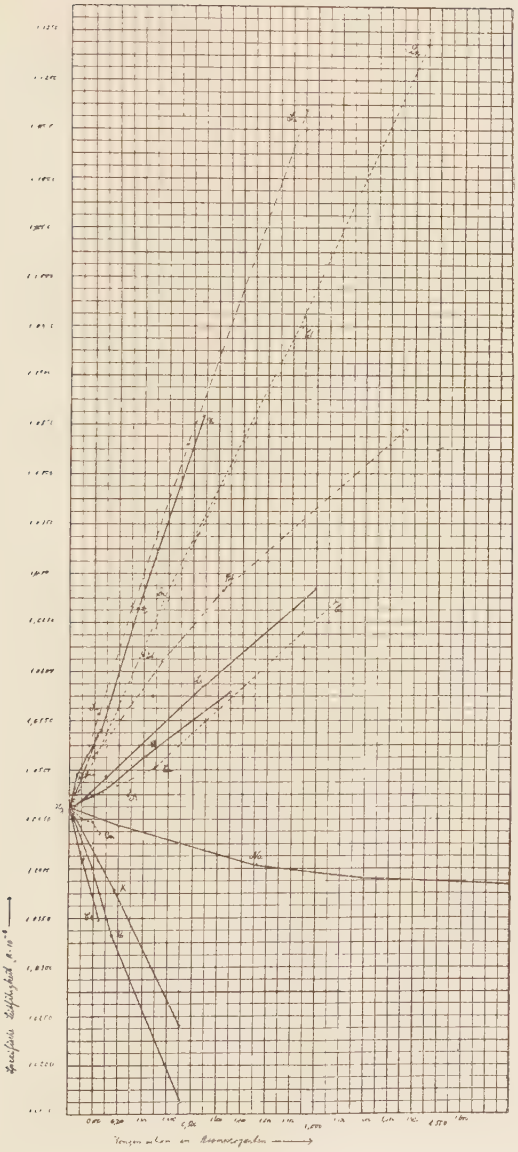
———×———

Die vorliegende Arbeit habe ich im physikalisch-chemischen Institut der Universität Freiburg i. B. auf Anregung des Herrn Professor Dr. Georg Meyer ausgeführt. Es sei mir gestattet, meinem hochverehrten Lehrer für die liebenswürdige Beratung und stete Förderung meiner Arbeit an dieser Stelle aufrichtigsten Dank zu sagen.

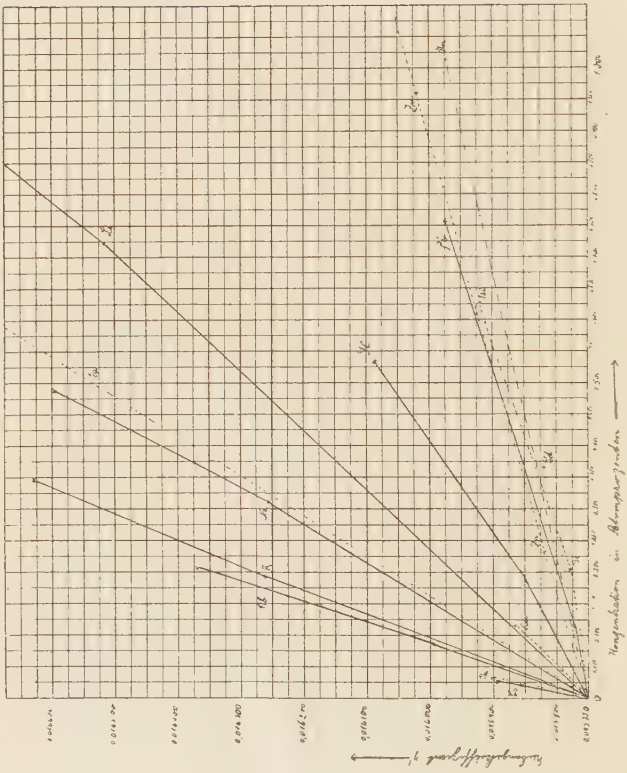
Tafel 1.



Tafel 2.



Tafel 3.



Tafel 4.

Tabelle 7.

Reibungskoeffizient des Quecksilbers bei 18° C $\eta = 0{,}015750$.

In *Hg* gelöstes Metall	Konzentration in Atom-%	Konzentration in Gewichts-%	Spez. Gewicht s'	Durchflußzeit in Sekunden τ	Durchflußzeit in Sekunden τ'	Reibungskoeffizient η'	$\eta' - \eta$	$\frac{\eta'-\eta}{\text{Atom-\%}} \cdot 10^5$	P_1	P_2	Diffusionskonstante D	$\frac{\eta'-\eta}{\nu} \times D^2$	φ_0	φ	Relative Leitfähigkeit beobachtet	Relative Leitfähigkeit berechnet	In *Hg* gelöstes Metall
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
Li	0,723	0,0252	13,468	551,0	581,4	0,016517	0,000767	106	$2{,}46 \times 10^{-8}$	$1{,}71 \times 10^{-8}$	bei 8,2° C $7{,}63 \times 10^{-6}$	$7{,}0 \times 10^{-16}$	0,00635	0,0195	1,0156	1,0450	*Li*
	1,062	0,0371	13,431	528,9	574,0	0,016941	0,001191	112	2,51 „ „			7,4 „ „	0,00935	0,0303	1,0226	1,0698	
Na	0,311	0,0358	13,489	524,2	543,5	0,016255	0,000505	162	2,84 „ „	2,09 „ „	„ 9,6° „ 7,41 „ „	9,8 „ „	0,00482	0,0128	0,9977	—	*Na*
	0,482	0,0555	13,455	506,2	537,2	0,016596	0,000846	175	2,92 „ „			10,5 „ „	0,00768	0,0215	0,9965	—	
K	0,191	0,0372	13,477	560,3	581,6	0,016262	0,000512	268	3,37 „ „	2,60 „ „	„ 10,5° „ 6,02 „ „	8,7 „ „	0,00580	0,0130	0,9916	—	*K*
	0,344	0,0673	13,415	556,9	593,7	0,016631	0,000881	256	3,31 „ „			8,3 „ „	0,01048	0,0224	0,9841	—	
Rb	0,085	0,0352	13,513	556,1	566,2	0,015991	0,000241	285	3,46 „ „	2,79 „ „	„ 7,3° „ 5,32 „ „	6,5 „ „	0,00315	0,00613	0,9948	—	*Rb*
	0,205	0,0854	13,460	558,9	584,9	0,016371	0,000621	303	3,52 „ „			7,0 „ „	0,00760	0,0158	0,9864	—	
Cs	0,021	0,0137	13,540	524,0	527,9	0,015854	0,000104	506	4,14 „ „	3,02 „ „	„ 7,3° „ 5,21 „ „	10,6 „ „	0,00099	0,00264	0,9986	—	*Cs*
	0,026	0,0170	13,538	519,0	524,2	0,015892	0,000142	554	4,28 „ „			11,6 „ „	0,00123	0,00361	0,9981	—	
Ca	0,934	0,188	13,358	519,3	575,9	0,017217	0,001467	157	2,80 „ „	2,16 „ „	„ 10,2° „ 6,45 „ „	6,2 „ „	0,01015	0,0373	1,0085	1,0892	*Ca*
Ba	0,032	0,022	13,544	552,4	558,2	0,015903	0,000153	478	4,07 „ „	2,42 „ „	„ 7,8° „ 6,02 „ „	15,4 „ „	0,00079	0,00389	0,9990	—	*Ba*
Zn	0,233	0,076	13,540	294,7	296,2	0,015819	0,000069	30	1,61 „ „	1,54 „ „	„ 11,5° „ 25,20 „ „	70,4 „ „	0,00149	0,00175	1,0115	1,0049	*Zn*
	0,960	0,315	13,517	526,2	536,7	0,016018	0,000268	28	1,58 „ „			65,9 „ „	0,00617	0,00682	1,0484	1,0191	
	1,938	0,640	13,489	294,7	307,0	0,016312	0,000562	29	1,59 „ „			67,6 „ „	0,01248	0,01428	1,0966	1,0400	
	3,555	1,187	13,448	526,2	566,6	0,016779	0,001029	29	1,59 „ „			67,0 „ „	0,02310	0,02618	1,1804	1,0733	
Cd	0,365	0,205	13,541	382,0	383,9	0,015819	0,000069	19	1,39 „ „	1,71 „ „	„ 8,7° „ 16,8 „ „	13,2 „ „	0,00322	0,00175	1,0188	1,0042	*Cd*
Sn	1,012	0,603	13,513	381,8	389,2	0,015974	0,000224	22	1,46 „ „	1,81 „ „	„ 10,7° „ 17,7 „ „	18,2 „ „	0,01115	0,00570	1,0719	1,0122	*Sn*
Au	0,046	0,045	13,553	556,1	557,5	0,015792	0,000042	92	2,35 „ „	1,60 „ „	„ 11,0° „ 8,33 „ „	7,2 „ „	0,00032	0,00117	1,0028	1,0030	*Au*
	0,115	0,113	13,556	556,1	560,0	0,015866	0,000116	101	2,43 „ „			7,9 „ „	0,00081	0,00295	1,0070	1,0082	
Tl	0,201	0,204	13,546	562,5	566,5	0,015837	0,000117	53	1,96 „ „	1,88 „ „	„ 11,5° „ 10,0 „ „	7,9 „ „	0,00233	0,00272	1,0032	1,0032	*Tl*
	0,532	0,541	13,539	562,5	575,5	0,016087	0,000337	63	2,08 „ „			9,4 „ „	0,00618	0,00857	1,0092	1,0101	
Pb	0,114	0,118	13,550	289,3	289,8	0,015773	0,000023	20	1,42 „ „	1,92 „ „	„ 9,4° „ 17,36 „ „	15,6 „ „	0,00141	0,00059	1,0070	1,0010	*Pb*
	0,756	0,780	13,544	289,3	293,9	0,015976	0,000226	30	1,62 „ „			23,7 „ „	0,00934	0,00575	1,0543	1,0097	
Bi	0,204	0,211	13,537	510,5	511,9	0,015780	0,000030	15	1,28 „ „	2,02 „ „	—	—	0,00307	0,00076	1,0089	—	*Bi*
	0,623	0,646	13,513	510,5	517,2	0,015920	0,000170	27	1,57 „ „			—	0,00895	0,00433	1,0213	—	